

# The Optimization Design of AC Filter in the HVDC Transmission Based on AHP

Chen Huan<sup>1</sup>, Hu Wen<sup>2</sup>, Zhao Chun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Test & Maintenance Center, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou, China <sup>2</sup>School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan, China Email: dqchh@yahoo.cn, huwen1025@hotmail.com, chunzi207@126.com

**Abstract:** HVDC different from AC transmission is that the inverter station of HVDC have plenty of characteristic harmonics which have damages to the AC network. In order to simplify the filtering device, 12- pulse converters are gradually adopted in the HVDC transmission. This paper build a 12-pulse HVDC model using PSCAD/EMTDC, and the filter's model was built at rectifier side. The filtering effects of combination schemes are analyzed by simulation work, for the purpose of option screening. Finally, the optimization scheme can be chosen based on AHP, considering the THD and total investment.

Keywords: HVDC; characteristic harmonic; filter's design; AHP

# 基于层次分析法的高压直流输电交流滤波器优化设计

## 陈 欢<sup>1</sup>, 胡 雯<sup>2</sup>, 赵 淳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国南方电网超高压输电公司检修试验中心,广州,中国,510663 <sup>2</sup>武汉大学电气工程学院,武汉,中国,430072 Email: dqchh@yahoo.cn, huwen1025@hotmail.com, chunzi207@126.com

**摘 要:**高压直流输电异于交流输电的特点是,直流输电工程换流站产生大量的特征谐波,对交流系统侧产生严重影响。为了简化滤波装置,高压直流输电工程中大量采用 12 脉动换流站。本文在 PSCAD/EMTDC 环境下建立 12 脉动高压直流输电工程模型,并在其整流侧建立滤波器组模型,通过 大量投切对滤波器组合方案的滤波效果作出分析,根据滤波效果 THD 值筛选方案,并基于层次分析法 综合考虑滤波器组合的滤波效果 THD 值和总投资价格选出最优方案。

关键词: 高压直流输电; 特征谐波; 滤波器设计; 层次分析法

## 1 引言

高压直流输电(HVDC-high voltage direct current) 由于其稳定性好、低损耗、传输容量大以及易调节等优势,逐渐被人们广泛使用。目前为止世界上已经有 60 多项直流输电工程投入运行,从结构上看,高压直流输 电是交流-直流-交流形式的换流电路。

两端交流系统是实现HVDC必不可少的重要组成 部分,两端交流系统的强弱,系统结构和运行性能等对 HVDC工程的设计和运行有较大影响,另一方面,HVDC 工程运行性能的好坏也直接影响两端交流系统,多个换 流站交流母线间的电气联系较强的情况下,交直流系统 之间、直流与直流系统之间的相互作用很强,可能会导 致系统总体性能的明显下降,甚至威胁到系统的安全稳 定运行。而系统的谐波是其中最大的威胁<sup>[1]</sup>。

高压直流输电异于交流输电的特点是,直流输电工 程换流站产生大量的特征谐波,对交流系统侧产生严重 影响,6脉动HVDC的换流器产生6k±1次谐波,12脉 动产生12k±1次谐波。为减少谐波,越来越多的HVDC 工程采用12脉动换流站<sup>[2]</sup>。

本文通过交流母线电压、滤波器需要提供的无功 补偿、滤波器需要滤除的谐波次数这三个要求精确计 算几种重要滤波器的参数。通过 PSCAD/EMTDC 软件 包建立一个工程常用的 12 脉动高压直流输电工程模 型,并且在整流侧建立滤波器组模型,基于层次分析 法(AHP)综合考虑滤波器组合的滤波效果 THD(总 谐波畸变)值和总投资价格选取出最优方案,为实际 工程中滤波器的设计思路和方法提供理论依据。



# 2 12 脉动整流器产生特征谐波的原理

12 脉动换流器是由 2 个 6 脉动换流器串联而成, 其交流侧是通过换流变网侧绕组并联,换流变的阀侧 绕组一个为星形联接,一个为△形连接,从而使 2 个 6 脉动换流器的交流侧得到相位差为 30°的换相电 压。图 1 为 12 脉动换流器原理接线图。



Figure 1. Schematic diagram for three phase 12-pulse converter 图 1. 三相 12 脉动换流器示意图

12 脉动换流器由V1~V12 一共 12 个换流阀构成, 图 1 中给出了换流阀序号为其导通的顺序号,在每个 工频周期内有 12 个换流阀依次导通,所以需要 12 个 相应的顺序触发脉冲,脉冲之间间隔为 30°。12 脉动 换流器最大的优点是直流电压质量好,所含的谐波成 分少<sup>[3]</sup>。



以a相电流为例,图2为12脉动换流器交流侧电

流波形,以下考虑换相角 *µ*=0 的情况分析 12 脉动换 流变网侧电流谐波<sup>[4]</sup>:

1) Y/Y 型换流变阀侧、网侧电流表示为:  
$$i_{A1}(\omega t) = \frac{2\sqrt{3}I_d}{\pi} \begin{bmatrix} \cos \omega t - \frac{1}{5}\cos 5\omega t + \frac{1}{7}\cos 7\omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \frac{1}{13}\cos 13\omega t \\ -\frac{1}{17}\cos 17\omega t + \frac{1}{19}\cos 19\omega t - \frac{1}{23}\cos 23\omega t + \frac{1}{25}\cos 25\omega t - \dots \end{bmatrix}$$

且星形连接的 6 脉动换流器阀侧电流其感应的网 侧的线电流相等,即:

$$\begin{split} i_{a1}(\omega t) &= i_{A1}(\omega t) \\ 2) \ \mathbf{Y}/\bigtriangleup \mathfrak{Y} \mathfrak{B} \mathfrak{B} \mathfrak{B} \mathfrak{B} \mathfrak{K} \mathfrak{M} \mathfrak{M} \mathfrak{M} \mathfrak{B} \mathfrak{K} \mathbf{:} \\ i_{a2}(\omega t) &= \frac{2\sqrt{3}I_{d}}{\pi} \begin{bmatrix} \cos \omega t + \frac{1}{5}\cos 5\omega t - \frac{1}{7}\cos 7\omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \frac{1}{13}\cos 13\omega t \\ + \frac{1}{17}\cos 17\omega t - \frac{1}{19}\cos 19\omega t - \frac{1}{23}\cos 23\omega t + \frac{1}{25}\cos 25\omega t + ... \end{bmatrix} \\ 3) \ \mathfrak{K} \mathfrak{U} \mathfrak{B} \mathfrak{D} \mathfrak{M} \mathfrak{M} \mathfrak{G} \mathfrak{B} \mathfrak{K} \mathfrak{B} \mathbf{K} \mathbf{S} \mathbf{:} \\ i_{a}(\omega t) &= i_{a1}(\omega t) + i_{a2}(\omega t) = \frac{4\sqrt{3}I_{d}}{\pi} \begin{bmatrix} \cos \omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \frac{1}{13}\cos 13\omega t \\ -\frac{1}{23}\cos 23\omega t + \frac{1}{25}\cos 25\omega t - ... \end{bmatrix} \end{split}$$

可见,两个换流器产生的5、7、17、19…(6k±1,k为奇数)次谐波相互抵消,在交流侧只产生12k±1(k为正整数)次谐波,各次谐波有效值与谐波次数呈反比关系,且与基波有效值的比值是谐波次数的倒数。

#### 3 12 脉动 HVDC 交流滤波器优化设计

12 脉动直流输电系统换流阀组在换相过程中会 在交流系统产生各种特征谐波与非特征谐波,在馈入 至交流电网时,换流变压器承受了全部谐波分量,并 且还有相当部分的直流分量,而传统的谐波抑制与无 功补偿方式只是被动地解决了交流电网的电能质量问 题,对于换流变压器这个重大的直流输电电气设备所 遭受的谐波污染并未起到任何抑制作用。目前的做法 只能是在换流变压器设计时计及谐波容量而留出相应 的裕度,并通过各种磁屏蔽技术、降噪技术和冷却装 置被动地降低谐波在换流变压器中产生的危害。本文 采用了混合滤波方式,即针对特征谐波在阀侧绕组实 施感应滤波以及针对高次谐波在交流母线实施无源滤 波,有效的改善了滤波效果。

#### 3.1 滤波器优化设计流程

如图3所示是HVDC工程交流滤波器优化设计的 流程,本文根据经验选定一种滤波器方案后,根据母 线电压 U=500kV,总无功补偿 Q=600Mvar 等参数计 算各种滤波器参数,准备投入12 组滤波器,每组分别 提供无功补偿为 50Mvar。采用 PSCAD/EMTDC 建模, 对几种滤波器的搭配方案提取其 THD,并计算其总投 入价格,最后采用层次分析法根据 THD 和总投入价 格建立判断矩阵,确定滤波器组合方案的优化排序。



Figure 3. Flowchart of filter design 图 3. 滤波器设计步骤流程图

### 3.2 滤波器参数计算

根据母线电压 U=500kV、滤波器组总无功补偿 Q=600Mvar。使用的滤波器分别为C型、双调谐、高 通、电容器组如图4所示。





滤除的谐波次数分别为: 3 次、11 和 13 次、24 次(23、25 次)、高次谐波。共投入 12 组滤波器, 每组分别提供无功补偿为 50Mvar,则各滤波器参数计 算如下:

C 型滤波器:  $C_{cl}$ =0.63662 $\mu$ F,  $C_{c2}$ =5.093 $\mu$ F,  $L_c$ =1989.4mH,  $R_c$ =1800 $\Omega$ ;

双调谐滤波器:  $C_I$ =0.63204 $\mu$ F,  $L_I$ =112.1mH,  $C_2$ =22.596 $\mu$ F,  $L_I$ =3.1mH, R=2000 $\Omega$ ;

高通滤波器: C<sub>b</sub>=0.63551µF, L<sub>b</sub>=27.6791mH,

 $R_h=500\Omega;$ 

电容器组: C=0.63662µF。

#### 3.3 12 脉动 HVDC 仿真模型建立

图 5 为投入交流滤波器的 12 脉动 HVDC 的物理 模型图,利用 PSCAD/EMTDC 软件包建立其模型。



Figure 5. Physical model of a 12-pulse HVDC with AC filters 图 5. 投入交流滤波器的 12 脉动 HVDC 物理模型

其中各个部分参数为:

交流系统,母线电压 U=500KV,频率 f=50HZ; 交流侧电路阻抗,R= 26.07Ω,L= 48.86mH,并 联;

换流器控制电路, 触发角 α=22°。

其中交流滤波器为本文主要研究对象,这里的交流滤波器指的是滤波器组,包括上节所述的 C 型滤波器、双调谐滤波器、高通滤波器、电容器组,为投切方便,每个模块里包含多组滤波器,通过开关控制各自数量的投切。

#### 3.4 滤波器组合方案优化分析

如上述,本文准备投入C型滤波器、双调谐滤波器、高通滤波器、电容组这四种类型的滤波装置用于 滤除一个母线电压为500KV、传输容量为1000MW的 HVDC的交流侧谐波,滤波装置需要提供的无功补偿 Q为600Mvar,滤波装置总共为12组,每组提供无功 补偿50Mvar,以总谐波畸变量THD<1.5%为标准筛 选方案,然后对符合该要求的方案进行投资费用计算, 最后采用层次分析法模型综合考虑投资价格和THD 选择最终的优化方案。

#### 3.4.1 交流滤波器总投资费用计算

从滤波器的结构图可以看出,滤波器的所有元件 均为电抗器、电容器、电阻构成,而C型滤波器的投





资费用可以由下式表示<sup>[5]</sup>:

$$M_{ch} = k_{C1}S_{C_{c1}} + k_{C2}S_{C_{c2}} + k_LS_{L_c} + k_RP_{R_c}$$
  
双调谐滤波器:

 $M_{dt} = k_{C1}S_{C_1} + k_{C2}S_{C_2} + k_L(S_{L_1} + S_{L_2}) + k_RP_R$ <br/>
<br

$$M_{hp} = k_{C2} S_{C_h} + k_L S_{L_h} + k_R P_R$$

电容器组:

$$M_C = k_{C2}S_C$$

其中 *k<sub>Cl</sub>、k<sub>C2</sub>*分别为高压侧和低压侧的电容器的 单位容量价格,*k<sub>L</sub>*为电抗器的单位容量价格,*k<sub>R</sub>*为电 阻的单位容量价格:

$$k_{c1} = 26\pi / \text{k var}$$
;  $k_{c2} = 26\pi / \text{k var}$ ;  
 $k_{c2} = 220\pi / \text{k var}$ ;  $k_{c2} = 50\pi / \text{k var}$ ;

$$x_L = 22000 \text{ K vm}$$
  $x_R = 3000 \text{ K vm}$   
式中各原件的滤波容量为<sup>[6]</sup>:

电容器容量为:

$$S_{C_i} = \sum_{n=1}^m U_{nC_i}^2 \cdot n\omega_1 C_i$$

电抗器容量为:

$$S_{L_{i}} = \sum_{n=1}^{m} \frac{U_{nL_{i}}^{2}}{n\omega_{1}L_{i}}$$

电阻容量为:

$$P_{R_{i}} = \sum_{n=1}^{m} \frac{U_{R_{i}}^{2}}{R_{i}}$$

其中, $U_{nCi}$ 、 $U_{nLi}$ 、 $U_{nRi}$ 分别为电容  $C_i$ 、电感  $L_i$ 、 电阻  $R_i$ 的两端的第 n 次的谐波电压有效值,单位 V;  $\omega_I$  为基波角频率;n 为谐波次数;m 为交流滤波器设 计时考虑的谐波最高次数,我国一般取 50 次。

#### 3.4.2 层次分析法理论

层次分析法(Analytic Hierarchy Process — AHP),是从定性分析到定量分析综合集成的一种典型的系统工程方法,它将人们对复杂系统的思维过程数学化,将人的主观判断为主的定性分析进行定量化,将各种判断要素之间的差异数值化,帮助人们保持思维过程的一致性,适用于复杂的模糊综合评价系统,是目前一种被广泛应用的确定权重的方法。AHP的基本思想是先根据问题的性质建立起一个描述系统功能或特征的内部独立的递阶层次结构,通过两两比较因素(或目标、准则、方案)的相对重要性,给出相应的比例标度,构造上层某一因素对下层相关因素的判断矩阵,给出下层相关因素对该上层因素的相对重要序列,如图6所示。AHP的核心问题是排序问题,它运用了递阶层次结构原理、标度原理和排序原理。运 用 AHP 解决问题的过程大体可分为 4 个步骤: 建立问题的递阶层次结构模型;构造两两比较判断矩阵;层次单排序及其一致性检验;层次总排序及其一致性检验。



Figure 6. Model of AHP structure 图 6. 层次结构模型图

#### 3.4.3 综合 THD 值与总投资选定滤波器组方案

本文通过系统模型参数确定各种方案后采用总谐 波畸变量 THD<1.5%进行筛选,并对满足要求的各方 案计算总投资费用,如表1所示。

Table 1. Investment and THD of different schemes 表 1. 各种方案的投资费用、THD

组合方案序号	总投资 (百万元)	THD	最优方案权重
1	16.446	1.22%	0.066562155717432
2	16.370	1.12%	0.15861883680307
3	16.313	1.06%	0.237700625413495
4	16.262	1.35%	0.173053697044775
5	18.027	1.28%	0.012361856848387
6	17.942	1.22%	0.029495810785559
7	17.819	1.22%	0.048548762873558
8	17.847	1.05%	0.194282948384511
9	19.519	1.28%	0.00648255991164
10	19.405	1.24%	0.014880257113386
11	19.436	1.13%	0.058012489104189

如表1所示,综合考虑滤波效果和投资费用,通 过层次分析法进行分析得知方案3、8、4 依次应为优 先考虑的滤波器组合方案。由于本文模型中3 次谐波 含量不是太高,故C型滤波器的作用不是很明显,但 实际工程中交流系统的不稳定往往更容易产生大量的 3 次谐波。

#### 4 结论

HVDC 中的换流器产生大量谐波,这些谐波如果



不经过滤除而进入交流系统,将产生严重的危害,为 减少谐波含量,目前 HVDC 工程中越来越多的使用 12 脉动换流器,本文就 12 脉动的 HVDC 工程交流侧 滤波问题展开交流滤波器的优化设计研究,并得到以 下结论:

1)本文通过 PSCAD/EMTDC 软件包建立一个工 程常用的 12 脉动高压直流输电工程模型,并且在整流 侧建立滤波器组模型,仿真分析不同滤波器组合的滤 波效果,为实际工程中滤波器的设计思路和方法提供 重要的理论依据。

2)本文采用层次分析法综合考虑滤波器组总投资 费用和总谐波畸变量 THD,确定最优方案权重排序, 根据此结果并结合工程实际确定滤波器组合方案。

# References (参考文献)

- Lihua Hu, Morrison R.E, The Use of Modulation Theory to Calculate the Harmonic Distortion in HVDC Systems Operating on an Unbalanced Supply[J], *IEEE Trans. on Power Systems*, 1997, 12(2), P973-980.
- [2] K. Sadek, M. Pereira, Harmonic Transfer in HVDC Systems under Unbalanced Conditions[J], *IEEE Trans. on Power Systems*, 1999, 14(4), P1394-1399.
- [3] N. L. Shore, K. Adamson, P. Bard, et al, DC Side Filters for Multiterminal HVDC Systems[J], *IEEE Trans. on Power Deliv*ery, 1996, 11(4), P1970-1984.
- [4] Yu Jun, Liu Zehong, Shi Yan, Studies on Design of DC Filters of Three Georges to Changzhou ±500kV HVDC Link [C], Proceedings of 1998 International Conference on Power System Technology, Beijing, China, 1998, P18-21.
- [5] Jiazhu Xu, Longfu Luo, Ji LI, et al, Influence Analysis of Compensation Factor at the Valve Side on HVDC Transmission System Based on Filter Commutated Converter[C], *DRPT2008*, Nanjing, China, 6-9 April, 2008.
- [6] IEC 60919, Performance of high-voltage DC (HVDC) system part 1: steady-state conditions[S]. 1999.